

Transformador de Corrente com Núcleo Toroidal de Liga Nanocristalina

Benedito A. Luciano, *Member, IEEE*, Raimundo C. S. Freire, José Gutemberg A. Lira, Glauco Fontgalland, *Member, IEEE*, e Walman B. de Castro.

Abstract- Based on electric and magnetic properties, like high saturation magnetization, high initial permeability, low core loss, high resistivity, and low coercivity, in this work are presented some considerations about the possibilities of applications of nanocrystalline alloys in toroidal cores for current transformers. It is discussed how the core magnetic characteristics affect the current transformer performance. The results show the potential of nanocrystalline alloys for applications in measurement current transformer cores, because these alloys can reduce the phase errors and can improve its accuracy class.

Index Terms-- current transformer, nanocrystalline alloys, toroidal cores.

I. INTRODUÇÃO

EM núcleos de transformadores de corrente (TC) podem ser empregadas chapas laminadas aços ao silício de grão orientados, ligas permalloy, ligas amorfas ou ligas nanocristalinas, enroladas de forma toroidal.

Em termos de circuito elétrico, o enrolamento primário do TC é constituído de poucas espiras, com seção transversal compatível com a corrente que se deseja avaliar, enquanto seu enrolamento secundário tem número de espiras elevado e seção transversal pequena. Geralmente, esses enrolamentos são constituídos de condutores de cobre.

No tocante ao circuito magnético, a configuração toroidal é particularmente favorável, pois com essa geometria as linhas de fluxos percorrerão o material magnético numa direção de permeabilidade elevada, sem a presença de entreferros transversais. Neste particular, a característica magnética do material do núcleo é de grande importância, pois quanto mais elevada for a permeabilidade e mais baixa for a força coerciva, menor será a corrente de excitação necessária para estabelecer a densidade de fluxo magnético necessária o funcionamento do TC dentro de seus limites de classe de exatidão.

Como a qualidade das medições realizadas com TC está diretamente relacionada com a classe de exatidão desses equipamentos, eles devem operar com baixos erros de relação e erros de fase. A classe de exatidão depende da qualidade do circuito elétrico (baixa indutância de dispersão) e da qualidade

do material magnético (alta permeabilidade e baixas perdas) que constitui o núcleo do TC.

Neste trabalho são apresentados estudos comparativos, de forma analítica e experimental, em torno das aplicações de dois materiais ferromagnéticos nos núcleos toroidais dos TCs: a liga nanocristalina $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$ e a liga de $\text{Fe-3,2\%Si}$ de grão orientado.

Esses estudos têm por objetivo verificar a influência do material magnético do núcleo sobre a classe de exatidão do TC, particularmente no que diz respeito ao ângulo de fase.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

O método empregado neste trabalho seguiu duas etapas. Na primeira, partiu-se de um estudo analítico sobre o funcionamento do transformador de corrente, de uma forma geral, com ênfase no efeito das características magnéticas do material do núcleo sobre os erros de relação e de fase [3]. Na segunda etapa, foi realizado um estudo experimental comparativo entre dois TC de mesma potência nominal e mesma relação nominal, porém confeccionados com núcleos toroidais de diferentes materiais magnéticos: um com liga nanocristalina e outro com liga de FeSi de grão orientado..

A. Estudos analíticos

Como os TC são utilizados para alimentar instrumentos de baixa impedância em seu secundário, tais como amperímetros, bobinas de corrente de wattímetros, bobinas de corrente de medidores de energia elétrica e relés de corrente. Portanto, em uso, os TC funcionam praticamente como transformadores em curto-circuito.

1) *Circuito magnético equivalente:* o circuito magnético equivalente de um TC com núcleo toroidal pode ser representado por uma fonte de força magnetomotriz ($\mathcal{F}$) em série com uma relutância ($\mathfrak{R}$). Por analogia com a lei de Ohm, empregada em circuitos elétricos, o fluxo magnético ϕ estabelecido no núcleo pode ser calculado pela relação entre a força magnetomotriz e a relutância, conforme (1):

$$\phi = \mathcal{F}/\mathfrak{R} \quad (1)$$

A intensidade de campo magnético, $H(t)$, e a indução magnética no núcleo, $B(t)$, podem ser obtidas pela lei de Ampère e pela lei de Faraday, respectivamente:

$$\text{rot}\vec{H} = \vec{J} \quad (\text{Lei de Ampère}) \quad (2)$$

Este trabalho recebeu apoio do PROCAD/CAPES –0104/01-9 e do CNPq.

B. A. Luciano, R. C. S. Freire, J. G. A. Lira e G. Fontgalland são professores da Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande – PB, Brasil (e-mail: benedito@dee.ufcg.edu.br).

W. B. de Castro é professor da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande – PB, Brasil

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (\text{Lei de Faraday}) \quad (3)$$

Em regime quase estático, a relação entre a indução magnética e a intensidade de campo magnético depende da permeabilidade magnética do material:

$$\dot{\mathbf{B}} = m \dot{\mathbf{H}} \quad (\text{Relação constitutiva}) \quad (4)$$

É oportuno observar que a relação constitutiva (4) só é válida se o material for considerado isotrópico. Por outro lado, caso a *anisotropia magnética* seja levada em conta, a permeabilidade magnética m não mais poderá ser considerada um escalar. Neste caso, deverá ser tratada como um *tensor de permeabilidade*, sob a notação $\parallel m \parallel$. E, além disso, se o fenômeno da saturação magnética for incluído, a relação $B(H)$ deverá ser reescrita na forma seguinte:

$$\dot{\mathbf{B}} = \parallel m(H) \parallel \dot{\mathbf{H}} \quad (5)$$

Em termos de cálculo de campo magnético, a inclusão do *tensor de permeabilidade* tornaria o estudo bem mais preciso. Todavia, tal procedimento resultaria num aumento considerável no tempo de processamento, devido ao grau de complexidade do referido cálculo.

2) *Circuito elétrico equivalente*: em um transformador convencional, a corrente I_p do primário surge como consequência da corrente I_s que percorre a carga Z_c posta no secundário desse transformador e a corrente de excitação I_e independe da impedância dessa carga.

Num TC, entretanto, a corrente I_p é imposta ao primário, sendo originada diretamente por solicitação da carga Z_c com a qual o TC está ligado em série, estabelecendo a corrente I_s como uma consequência de I_p , independentemente do instrumento que estiver ligado ao seu secundário (carga Z_c).

Na Fig. 1 é apresentado o circuito elétrico equivalente para o TC. Nela, Z_s representa a impedância equivalente do enrolamento secundário, refletido ao primário; Z_m representa a impedância do ramo de magnetização, representativo das perdas eletromagnéticas por histerese e por correntes parasitas.

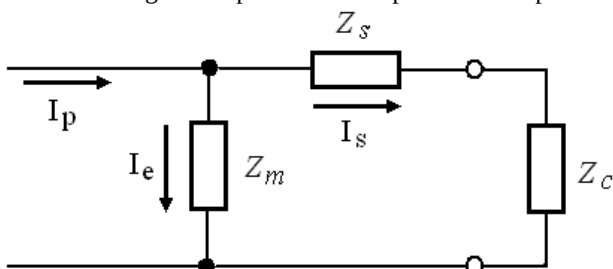


Fig. 1. Circuito elétrico equivalente do transformador de corrente, refletido ao primário.

B. Diagrama fasorial e erros do TC

O diagrama fasorial do TC é apresentado na Fig. 2. A partir dele, verifica-se que o TC, ao refletir no secundário o que se passa no primário, pode introduzir dois erros: o erro de relação e o erro de fase.

O erro de relação é definido, conforme (6), como o valor relativo percentual da diferença entre o valor medido da corrente primária ($K_c I_2$) e o valor verdadeiro ou exato da corrente primária (módulo de I_1), obtido no diagrama fasorial.

$$e_c = \frac{K_c I_2 - |\mathbf{I}_1|}{|\mathbf{I}_1|} \cdot 100\% \quad (6)$$

O erro de fase de um TC é definido a partir do diagrama fasorial apresentado na Fig. 2 como sendo o ângulo de defasagem β existente entre a corrente primária I_1 e o inverso da corrente secundária I_2 . Se o inverso de I_2 é adiantado em relação a I_1 , β é positivo. Em caso contrário, é negativo [1].

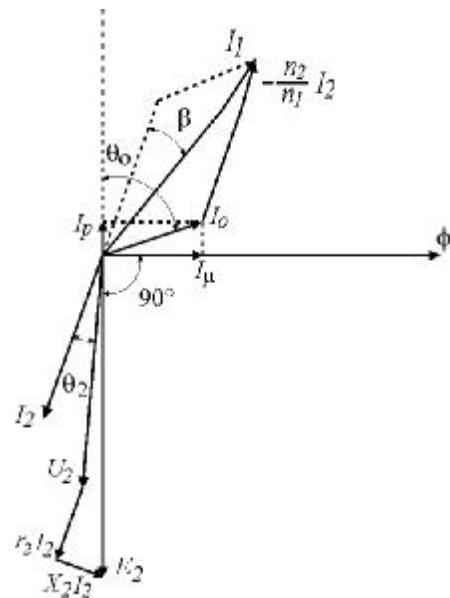


Fig. 2. Diagrama fasorial do transformador de corrente.

A principal causa dos erros de relação e de fase de um transformador de corrente é a corrente de excitação I_0 . No caso de um TC ideal, em que a esta corrente não existe, os fasores $\mathbf{I}_1$ e $-(n_2/n_1) \cdot \mathbf{I}_2$ da Fig. 2 seriam coincidentes, em módulo e em fase. Dessa forma, o valor da corrente primária medido a partir do valor da corrente secundária seria igual ao módulo do fasor $\mathbf{I}_1$ obtido pelo diagrama fasorial e este fasor $\mathbf{I}_1$ estaria defasado de exatamente 180° de $\mathbf{I}_2$. Portanto, para redução dos erros de um TC, por parte de seu projetista, é necessário que a corrente de excitação seja reduzida ao máximo possível. Mesmo tomando estas providências, quando o TC é posto em operação com uma carga sendo conectada a seu circuito secundário, os erros de relação e de fase do TC irão sofrer a influência de dois outros fatores: a corrente primária e a corrente secundária.

Analisando-se a Fig. 2, podem ser verificadas as influências da corrente de excitação e da corrente primária nos erros do TC [1].

Nesta figura, quando se projetam os fasores $\dot{I}_o$ e $\dot{I}_2$ sobre o fasor $\dot{I}_1$, obtém-se:

$$|\dot{I}_1| = K_c |\dot{I}_2| \cos b + |\dot{I}_o| \cos[90^\circ - (a + b + d)] \quad (7)$$

na qual, α é o ângulo entre a corrente de excitação I_0 e o fluxo de magnetização ϕ , e δ é o ângulo entre o inverso de I_2 e o inverso de E_2 .

Devido ao seu valor relativamente muito pequeno, o ângulo β pode ser desprezado, simplificando a expressão:

$$|\dot{I}_1| = K_c |\dot{I}_2| + |\dot{I}_o| \sin(a + d) \Rightarrow \frac{K_c |\dot{I}_2| - |\dot{I}_1|}{|\dot{I}_1|} = -\frac{|\dot{I}_o|}{|\dot{I}_1|} \sin(a + d) \quad (8)$$

Analisando a segunda igualdade de (8), vê-se que seu primeiro membro equivale ao erro de relação do TC, que será considerado em módulo. Esta consideração leva a uma nova expressão:

$$\frac{K_c |\dot{I}_2| - |\dot{I}_1|}{|\dot{I}_1|} = -\frac{|\dot{I}_o|}{|\dot{I}_1|} \sin(a + d) \Rightarrow e_c = \frac{I_0}{I_1} \sin(a + d) \quad (9)$$

A partir da Fig. 2 obtém-se a seguinte expressão para a tangente do ângulo β :

$$\tan \beta = \frac{|\dot{I}_o| \sin[90^\circ - (a + b + d)]}{K_c |\dot{I}_2| \cos b} \quad (10)$$

Novamente, considerando que o ângulo β tem valor relativamente muito pequeno, tem-se uma nova expressão mais simples:

$$b = \frac{|\dot{I}_o|}{|\dot{I}_1|} \cos(a + d) \quad (11)$$

É possível verificar, partindo-se de (9) e (11) que tanto o erro de relação quanto o erro de fase do TC aumentam quando a corrente de excitação aumenta ou quando a corrente primária diminui. Assim sendo, é importante que o material magnético do núcleo do TC exija uma pequena corrente de excitação para ser magnetizado e também que o TC seja projetado para operar com um valor de corrente nominal o mais próximo possível do valor da corrente da instalação na qual ele está inserido em série, isto para que a influência da corrente primária nos seus erros seja mínima.

A corrente secundária de um transformador de corrente é dependente da corrente primária, não sofrendo influência da impedância do elemento conectado em seu secundário. Mas, se esta impedância ultrapassar os valores limites determinados pela potência máxima com a qual o TC teve sua classe de

exatidão determinada, os erros introduzidos pelo TC podem ser bem mais elevados do que aqueles obtidos nos ensaios [1].

Quando uma certa impedância Z é conectada ao secundário de um TC, circula por ela uma corrente I_2 e os erros de relação e de fase, respectivamente ε_c e β , são determinados por (9) e (11). Quando, então, a impedância Z tem seu módulo aumentado, conservando a mesma fase, para que a corrente I_2 mantenha-se constante é necessário que a tensão secundária U_2 aumente seu valor. Para que isto ocorra, a força eletromotriz E_2 terá que aumentar seu módulo e, assim, também acontecerá com o fluxo ϕ no núcleo. Como a corrente de excitação I_0 é quem produz este fluxo, ela deve aumentar o seu valor, conseqüentemente aumentando também os erros de relação e de fase do TC. Esta análise da influência da corrente secundária nos erros do TC é importante, pois alerta quanto à limitação da resistência dos condutores que serão utilizados para a conexão do enrolamento secundário do TC aos instrumentos que este irá alimentar.

C. Confeção do protótipo

No transformador toroidal o núcleo é confeccionado em forma de anel, formado por uma fita de metal ferromagnético laminado, firmemente unida, sobre o qual são postos os enrolamentos do circuito elétrico (fio de cobre) de forma a cobrir toda a superfície, propiciando, desta maneira, uma boa concentração das linhas de fluxo magnético e, por conseqüência, o mínimo de reatância de dispersão.

A confecção do núcleo a partir de fitas difere bastante da montagem convencional a partir de chapas, pois no núcleo toroidal, sob forma um anel, a fita é contínua, com as extremidades soldadas uma à outra, para evitar que a estrutura desenrole; uma tarefa que requer muita habilidade se for executada manualmente, como no caso específico do protótipo de TC com núcleo de material nanocristalino apresentado neste trabalho essa tarefa foi executada manualmente.

Por outro lado, para a produção industrial desses tipos de transformadores, em larga escala, a solução é o emprego de uma máquina projetada especificamente para a realização dessa tarefa, num processo no qual a tensão mecânica sobre o fio pode ser facilmente controlada e o número de voltas em torno do núcleo pode ser determinado com precisão e rapidez. Nesse procedimento, as espiras são enroladas o mais próximas possível uma das outras, conforme apresentado na Fig. 2, o que reduz sobremaneira a reatância de dispersão e o erro de relação.



Fig. 3. Protótipo do transformador de corrente com núcleo toroidal

As dimensões do núcleo toroidal mostrado na Fig. 3 são as seguintes: diâmetro externo = 58,75 mm; diâmetro interno = 44,70 mm e altura = 20,00 mm.

A bitola do condutor do enrolamento secundário do TC foi dimensionada para uma densidade de corrente J igual a $3,5 \text{ A.mm}^{-2}$ sob corrente nominal de 5A.

O número de espiras foi calculado de acordo com a expressão (8), na qual $S = 5 \text{ VA}$, $B'_{op} = 0,4 \text{ T}$, $S_m = 1,15 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ (seção magnética do núcleo) e $f = 60 \text{ Hz}$:

$$N_2 = \frac{S}{4,44 \cdot I_2 \cdot B'_{op} \cdot S_m \cdot f} \approx 80 \text{ espiras} \quad (8)$$

Os dois materiais magnéticos empregados nos núcleos dos transformadores de corrente sob estudo são apresentados na Tabela I: a liga nanocristalina [2], fabricada pela empresa japonesa *Hitachi Metals Ltd.*, e o aço ao silício de grão orientado, fabricado pela empresa brasileira Acesita.

TABELA I
DADOS COMPARATIVOS DOS MATERIAIS MAGNÉTICOS SOB ESTUDO

Composição	Nome comercial	B_s (T) (60 Hz)	m_{rmax} (60 Hz)	ρ ($\mu\Omega.m$)
$\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$	FINEMET® FT-3M F6045G	0,90	185 000 ($3,0 \text{ A.m}^{-1}$)	1,20
Fe-3,2%Si	Aço ao silício GO E-004	1,85	40 154 ($23,0 \text{ A.m}^{-1}$)	0,47

D. Ensaios experimentais

Com o objetivo de investigar o comportamento dos TC em face de diferentes materiais magnéticos empregados no núcleo, foram realizados ensaios experimentais no Laboratório do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo, Brasil.

A norma técnica tomada como referência foi a NBR 6821 [4], sendo empregado o método comparativo, no qual o circuito primário do TC sob ensaio é ligado em série com o do TC – padrão.

Antes da realização dos ensaios, os núcleos dos TC foram desmagnetizados, de acordo com os procedimentos descritos nos itens 9.2.1 e 9.2.2 da citada norma (NBR 6821).

Nos testes comparativos, foram determinados os erros de relação, fator de correção de relação e os ângulos de fase dos TC sob estudo, conforme apresentado na Tabela II.

Na Fig. 4 é apresentada uma fotografia da montagem experimental na qual podem ser observados: o TC com núcleo de liga nanocristalina (ao centro) e o TC – padrão (à esquerda), ambos alimentados pela corrente primária (400 A).

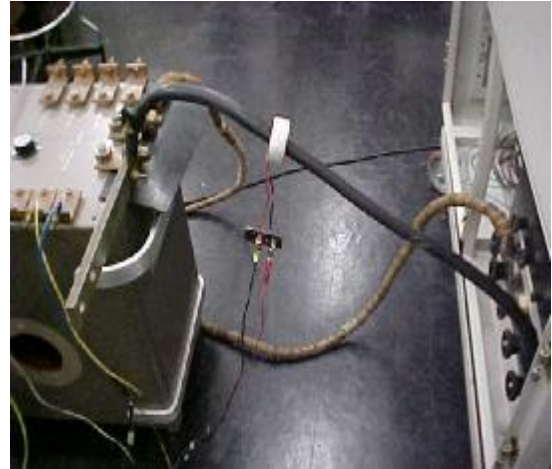


Fig. 4. Montagem experimental: TC padrão e TC sob ensaio.

Na Tabela II são apresentados os resultados dos ensaios experimentais realizados sob as seguintes condições:

- Corrente nominal primária 400 A;
- Corrente nominal secundária: 5 A;
- Relação nominal dos TC: 80;
- Relação nominal do TC padrão: 80;
- Frequência nominal: 60 Hz;
- Fator térmico: 1,2.

TABELA II
ENSAIOS EXPERIMENTAIS PARA A DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO DE FASE

CARGA: 2,5 VA			CARGA: 5,0 VA		
Ângulo de fase (minutos)			Ângulo de fase (minutos)		
%I ₂	FeSi	Nanocristalino	%I ₂	FeSi	Nanocristalino
10	8,5	2,2	10	10,5	2,8
25	6,6	1,9	25	7,8	2,2
50	5,3	1,5	50	6,0	1,6
75	4,6	1,4	75	5,0	1,2
100	4,0	1,3	100	4,2	1,3
120	3,7	1,3	120	3,7	0,9

Conforme pode ser observado na Tabela 2, o TC com núcleo de liga nanocristalina apresentou significativa redução do ângulo de fase quando comparado com o TC com núcleo de FeSi (material ferromagnético cristalino de grãos orientados), tanto para a carga de 2,5 VA, quanto para a carga de 5,0 VA.

III. CONCLUSÕES

Partindo-se dos resultados dos ensaios experimentais realizados, pode-se verificar que o TC com núcleo toroidal de liga nanocristalina apresenta menores valores de ângulo de fase (erro de fase), quando comparado com o TC com núcleo toroidal de FeSi, de características nominais idênticas, o que confirma a expectativa apresentada nos estudos analíticos e computacionais [3]-[5].

A justificativa para o melhor desempenho do TC com núcleo toroidal de liga nanocristalina, em termos de ângulo de fase, deve-se ao fato de a permeabilidade magnética da liga nanocristalina $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$ ser superior à permeabilidade magnética da liga de FeSi, o que resulta em menores valores das componentes das correntes de

magnetização e de perdas no núcleo.

IV. AGRADECIMENTOS

À Hitachi Metals Ltd (Japão) pela doação dos núcleos toroidais de ligas nanocristalinas, à ACESITA e TOROID do Brasil por suas valiosas contribuições.

V. REFERÊNCIAS

- [1] S. de Medeiros Filho, *Medição de Energia Elétrica*. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1997.
- [2] Y. Yoshizawa, S. Fujii, D. H. Ping, M. Ohnuma, and K. Hono, "Magnetic properties of nanocrystalline Fe-Co-Cu-M-Si-B alloys (M: Nb, Zr)". *Materials Science and Engineering A* 375-377, pp.207-212, 2004.
- [3] B. A. Luciano, J. M. Cavalcante de Albuquerque, W. Benício de Castro, e C. R. M. Afonso, "Transformador de corrente com núcleo toroidal de material nanocristalino: estudo analítico e computacional". Anais do XVI Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais - CDROM. Porto Alegre, 2004.
- [4] *NBR 6821-Transformador de corrente: método de ensaio*, Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.
- [5] B. A. Luciano, R. C. S. Freire, W. Benício de Castro, "TC com núcleo toroidal: influência do material magnético sobre o ângulo de fase". *Eletridade Moderna*, N.373, pp. 172-180, Abril 2005.

VI. BIOGRAFIAS

Benedito Antonio Luciano nasceu em Coremas, Paraíba, Brasil, em 9 de outubro de 1954. Concluiu os cursos de graduação, mestrado e doutorado em engenharia elétrica pela Universidade Federal da Paraíba em 1977, 1984 e 1995, respectivamente. Na contextualização da sua produção científica e tecnológica os termos mais frequentes são: Eficiência energética, Transformadores, Transformadores com núcleo de liga amorfa, Energia elétrica, Ligas amorfas, Ligas nanocristalinas e Materiais magnéticos. Atualmente é professor adjunto IV, lotado na Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, onde atua nos cursos de graduação e de pós-graduação em engenharia elétrica.

Raimundo C. S. Freire nasceu em Poço de Pedras, Rio Grande do Norte, Brasil, em 1955. Concluiu os cursos de graduação, mestrado e doutorado em engenharia elétrica em 1979, 1982 e 1988, respectivamente. Atualmente é professor adjunto IV, lotado na Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, onde atua nos cursos de graduação e de pós-graduação em engenharia elétrica. Suas áreas de interesse são instrumentação eletrônica, sensores e microeletrônica.

José Gutemberg A. Lira nasceu em Cajazeiras, Paraíba, Brasil, em 1952. Concluiu os cursos de graduação e mestrado em engenharia elétrica pela Universidade Federal da Paraíba em 1974 e 1979, respectivamente. Atualmente é professor adjunto IV, lotado na Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, onde está realizando curso de pós-graduação em nível de doutorado em engenharia elétrica. Suas áreas de interesse são instrumentação eletrônica, sensores, processamento digital de sinais e microeletrônica.

Glauco Fontgalland nasceu em Fortaleza, Ceará, Brasil, em 1966. Concluiu os cursos de graduação e mestrado em engenharia elétrica na Universidade Federal da Paraíba em 1989 e 1992, doutorado em engenharia elétrica pelo INPT, Toulouse, França, em 1999. Atualmente é professor adjunto IV, lotado na Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, onde atua nos cursos de graduação e de pós-graduação em engenharia elétrica. Suas áreas de interesse são instrumentação eletrônica, sensores e microeletrônica.

Walman B. de Castro nasceu em Campina Grande, Paraíba, Brasil, em 12 de maio de 1964. Concluiu os cursos de graduação e mestrado em engenharia mecânica pela Universidade Federal da Paraíba em 1988 e 1992,

respectivamente, e o curso de doutorado na Universidade Federal de São Carlos/SP em 1997. Na contextualização de sua produção científica e tecnológica os termos mais frequentes são: Solidificação rápida, Novos materiais, Super-resfriamento, Ligas amorfas e nanocristalinas, Brasagem de materiais dissimilares. Atualmente é professor adjunto IV, lotado na Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande, onde atua nos cursos de graduação em engenharia mecânica e materiais, e pós-graduação em engenharia de materiais e engenharia de processos.